

Исследование особенностей явления феррорезонанса в электрических сетях 6–35 кВ на основе математического моделирования

А. В. Попугаев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Попугаев А. В. Исследование особенностей явления феррорезонанса в электрических сетях 6–35 кВ на основе математического моделирования // Бюллетень результатов научных исследований. – 2021. – Вып. 2. – С. 59–68.
DOI: 10.20295/2223-9987-2021-2-59-68

Аннотация

Цель: Проанализировать существующие схемотехнические решения для предотвращения феррорезонансных явлений. Выполнить моделирование явления феррорезонанса в среде MATLAB Simulink для снижения его негативного воздействия на электротехнические системы. **Методы:** Применяемые методы основаны на анализе, синтезе и математическом моделировании электротехнических систем при возникновении феррорезонанса. **Результаты:** Показана необходимость совершенствования схемотехнических решений для предотвращения феррорезонансных явлений. Описана возможность использования моделирования феррорезонансных явлений в среде MATLAB Simulink с целью снижения негативного воздействия феррорезонанса и повышения надежности работы электротехнических систем. **Практическая значимость:** При моделировании в среде MATLAB Simulink можно получить результаты, которые позволят разработать мероприятия для уменьшения негативного воздействия феррорезонанса на электротехнические системы.

Ключевые слова: Феррорезонанс, моделирование, электротехнические системы, петля гистерезиса, трансформаторы напряжения.

Введение

Феррорезонанс является явлением не новым, а теоретические аспекты возникновения феррорезонанса описаны во многих работах [1–8]. Тем не менее появление феррорезонанса в электроэнергетических системах может вызвать проблемы с качеством энергии и безопасностью. На сегодня все большее число системных энергооператоров сталкивается с переходными колебаниями данного типа во время выполнения операций переключения на подстанциях. В настоящее время феррорезонанс становится все более частым в связи с ростом, расширением и усложнением энергосистем, что может привести к последующим катастрофическим повреждениям элек-

трического оборудования, влияющим на надежность электрических сетей [9–14].

Феррорезонанс в сети среднего напряжения возникает в результате взаимодействия между нелинейной индуктивностью трансформатора напряжения и емкостью относительно земли сети. Это явление обсуждается уже много лет. Но его сложно исследовать из-за высокой чувствительности даже к небольшим изменениям параметров электросети [15].

Во многих работах, в том числе и в [1–5], показано, что лучший вариант управления феррорезонансом в трансформаторах напряжения – установка демпфирующей цепи во вторичную (или третичную) обмотку трансформатора с разомкнутым треугольником.

Методика исследования

Наиболее типичная схема демпфирования состоит из постоянного включения простого резистора. Однако его применение может повлечь за собой несколько проблем, особенно в изолированных системах. Такие системы могут работать в условиях замыкания на землю в течение длительного времени, вызывая серьезные перенапряжения в разомкнутом треугольнике. Следовательно, тепловыделение в резисторе может быть слишком большим, что приведет к серьезным проблемам и снижению безопасности. Этот эффект усиливается в современных трансформаторах напряжения с малыми потерями, где сглаживающий резистор должен иметь очень низкое значение сопротивления [5–7]. Более современное решение, чем предыдущее, состоит в разработке демпфирующей цепи, образованной резистором, включенным последовательно с LC-фильтром или насыщающейся катушкой индуктивности. Характеристики LC-фильтров используются для гашения феррорезонансных колебаний на частотах, отличных от основной. Напротив, применение насыщающейся катушки индуктивности, соединенной последовательно с резистором, делает схему демпфирования подходящей для каждого феррорезонансного колебания, поскольку ее характеристики в отношении насыщения не зависят от частотного содержания. Таким образом, индуктор работает как магнитный переключатель: когда возникает явление феррорезонанса, индуктор насыщается, происходит уменьшение его импеданса и начинает работать последовательно включенный резистор, который позволяет ослабить феррорезонанс [8].

В последние годы некоторыми исследователями [9] было предложено выборочное подключение демпфирующего резистора. Таким образом, демпфирующая цепь подключается только в случае феррорезонанса и предотвращает возможное тепловое повреждение в несбалансированной ситуации. Это избирательное соединение подразумевает необходимость си-

системы обнаружения феррорезонанса. В настоящее время существуют четыре основных направления исследований в зависимости от критериев, используемых для обнаружения явления: анализ насыщения [9–11], анализ перенапряжения [12], анализ напряжения нулевой последовательности [13] и идентификация формы волны [14].

Емкостные трансформаторы напряжения обычно включают в себя систему подавления феррорезонанса. Хотя целью такой системы является эффективное гашение явления феррорезонанса, его включение может значительно повлиять на переходную характеристику трансформатора, вызывая неправильную работу реле защиты и связанных систем [7, 9].

Чтобы избежать или снизить феррорезонанс в трансформаторах напряжения емкостного типа также были предложены различные схемотехнические решения подавления феррорезонанса [11], включающие дугогасящий реактор для подавления феррорезонанса, фильтр блокировки основной частоты и электронную схему для подавления феррорезонанса.

Схема параллельного подключения нагрузочного резистора с дугогасящим реактором относится к схемам пассивного подавления феррорезонанса (СППФ). Чтобы смягчить состояние устойчивого феррорезонанса, дугогасящий реактор рассчитан на насыщение при примерно 150 % от нормального напряжения. Перенапряжение во время феррорезонанса насыщает реактор, и в результате последовательное сопротивление эффективно добавляет дополнительную нагрузку и ослабляет колебания феррорезонанса.

Схема, состоящая из катушек индуктивности с взаимной связью, конденсатора и демпфирующего резистора, относится к схемам активного подавления феррорезонанса (САПФ). Данная схема известна так же, как фильтр блокировки промышленной частоты. Фильтр настроен на основную частоту энергосистемы с высокой добротностью. САПФ действует как полосовой фильтр. Его схема показывает высокий импеданс на основной частоте. Когда частота отклоняется от основной частоты энергосистемы, полное сопротивление САПФ постепенно приближается к сопротивлению демпфирующего резистора. Колебания феррорезонанса гасятся с помощью резистора в САПФ.

САПФ более эффективны в гашении феррорезонансных колебаний, чем СППФ, потому как на частотную характеристику трансформаторов напряжения емкостного типа отрицательно влияет резонансный фильтр и вызывает ошибку в выходном сигнале в случае высших гармоник или быстрых изменений в системе напряжения.

Следующий подход заключается в использовании электронной схемы подавления феррорезонанса, предложенного в [8], где два переключателя в цепи управляют подключением резистора через вторичную обмотку

трансформатора напряжения емкостного типа. Конфигурация состоит из демпфирующего сопротивления и двух встречных тиристоров. Во время феррорезонанса или переходного режима переключатель включен на фиксированный интервал времени. Если феррорезонанс все еще существует, то переключатель остается включенным до тех пор, пока длительность феррорезонанса не уменьшится. Этот метод не содержит громоздких катушек индуктивности или конденсатора, что позволяет уменьшить его размер.

Электронная схема для подавления феррорезонанса с демпфирующим резистором более эффективна для гашения феррорезонанса, чем другие методы [12]. Кроме того, переходная характеристика трансформаторов напряжения емкостного типа с электронным типом является лучшей, чем у других схем для подавления феррорезонанса.

В последние годы использование электронных систем на основе силовых электронных устройств увеличивается благодаря их эффективности и невысокой стоимости.

В работе [12] показано, что добавление разрядника для защиты от перенапряжений значительно сократит время демпфирования и ограничит перенапряжения, которые возникают в трансформаторах напряжения емкостного типа во время первого цикла. Влияние активных, пассивных схем и устройств защиты для подавления феррорезонанса от перенапряжения трансформаторов напряжения емкостного типа приведено в [10], где указано, что при наличии или отсутствии устройств защиты от перенапряжения САПФ может уменьшить феррорезонанс в течение двух циклов, что быстрее, чем при пассивной схеме подавления феррорезонанса; точность вывода активной схемы трансформаторов напряжения емкостного типа меньше зависит от нагрузки по сравнению с пассивной схемой.

Известны [8] методики расчета электрических сетей с феррорезонансными явлениями, которые строятся на программном обеспечении ATP / EMTP, PSpice, FerroTool, FerroSim, MATLAB и др.

В [6, 9] дается базовый обзор опубликованных моделей, которые могут быть применены в среде MATLAB Simulink.

Рассмотрим первую модель, предлагаемую для исследования:

$$i(\psi) = f_{ODD}(\psi) + g_{EVEN}(\psi) \frac{d\psi}{dt},$$

где

$$f_{ODD}(\psi) = a_1\psi + a_3\psi^3 + a_5\psi^5 + \dots,$$

$$g_{EVEN}(\psi) = b_0 + b_2\psi^2 + b_4\psi^4 + \dots,$$

$$\psi = \psi(t).$$

Если для получения коэффициентов этой модели применить численное интегрирование напряжения для рабочих точек, то для модели, зависящей от производной тока, численное дифференцирование выполняется для всех рабочих точек. Таким образом, имея измеренные формы колебаний напряжения $u(t)$ и форм сигналов тока $i(t)$, могут быть получены формы сигналов сопряженного магнитного потока $\psi(t)$ и производной тока $i'(t)$. Эти сигналы должны быть дискретизированы с определенной частотой, например 50 кГц. Впоследствии коэффициенты отдельных моделей рассчитываются с использованием метода Лавемберка–Маркварта. В результате может быть получено уравнение модели трансформатора напряжения.

Вторая модель может быть сформирована на основании [6] с помощью следующей функции:

$$F(i(t), i'(t), \psi(t), \psi'(t)) = 0,$$

которую можно перезаписать в следующей форме:

$$U(t) = q_1 \cdot \psi(t) + \frac{q_2 \cdot i(t) + q_3 \cdot i'(t) + q_4 \cdot \psi(t)}{1 + q_5 \cdot (i(t)^2)^{q_6} + q_7 \cdot (\psi(t)^2)^{q_8}}.$$

Для решения модели необходимо решить дифференциальное уравнение первого порядка. Для этого выполняем моделирование простой феррорезонансной цепи в среде MATLAB Simulink.

На рис. 1 представлена блок-схема последовательной феррорезонансной цепи в среде MATLAB Simulink. Схема состоит из идеального источника питания переменного тока, его внутреннего и реактивного сопротивлений, последовательного соединения конденсатора, сопротивления и индуктивности, которые составляют первичную обмотку трансформатора, а также блока, представляющего нелинейную индуктивность трансформатора без потерь.

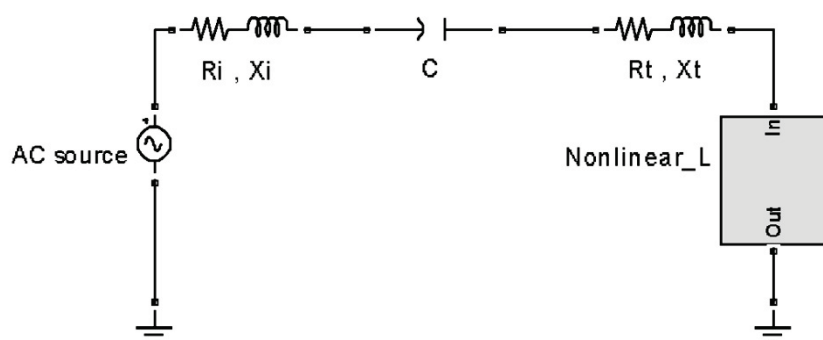


Рис. 1. Простая последовательная схема феррорезонанса в среде MATLAB Simulink

Сравнение форм напряжения для отдельных моделей иллюстрирует рис. 2, *а*, *б*; напряжение питания схемы имеет амплитуду 12 000 В и емкость 6 нФ.

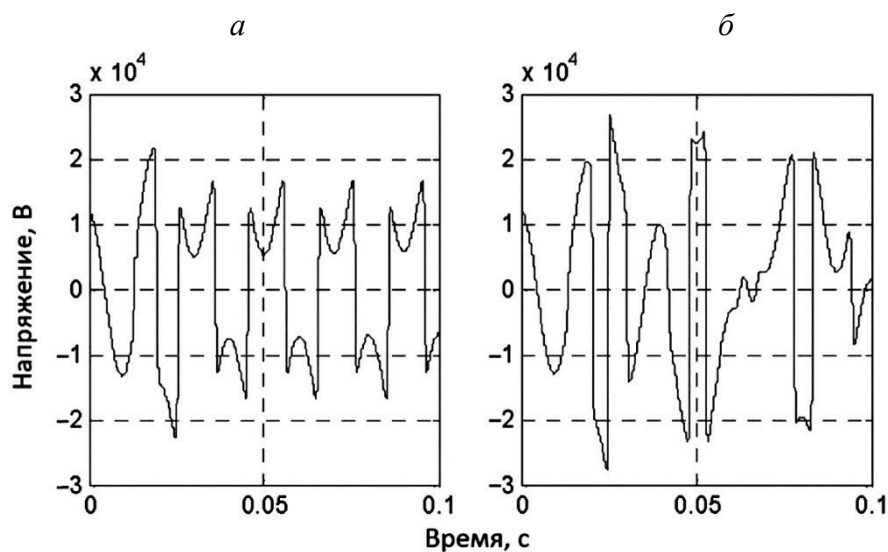


Рис. 2. Сравнение форм сигналов первой (*а*) и второй (*б*) моделей

На рис. 3, *а*, *б* сравниваются формы сигналов петель гистерезиса, а на рис. 4, *а*, *б* – представления фазовой плоскости.

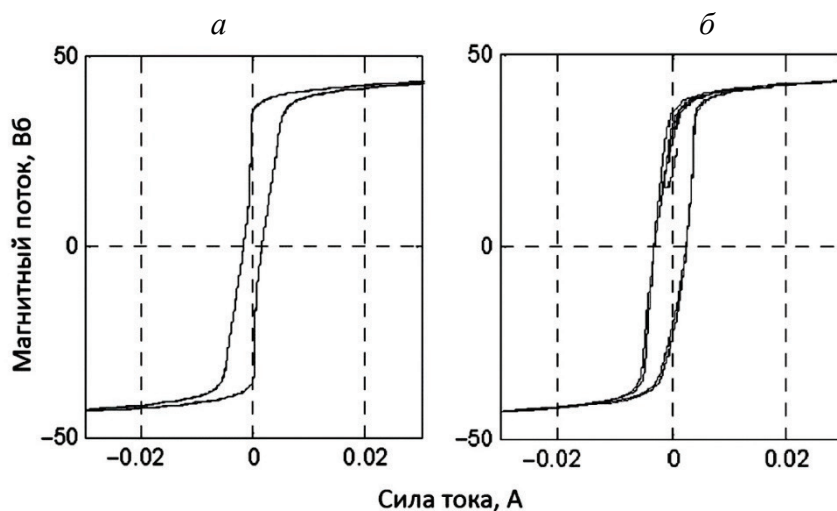


Рис. 3. Сравнение петель гистерезиса для первой (*а*) и второй (*б*) моделей

Квадратные маркеры на рис. 4 представляют так называемое S-представление (полупуанкаре). Очевидно, что для первой модели представление симметрично, т. е. это касается феррорезонанса на основной частоте,

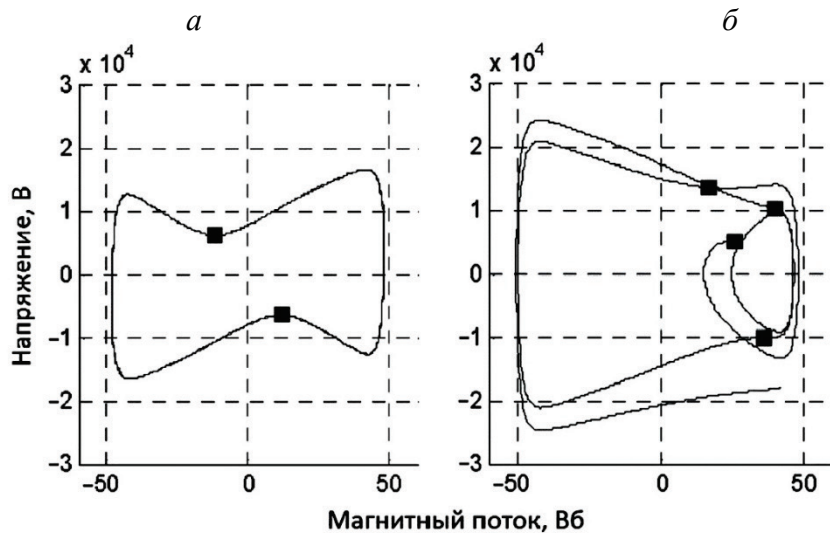


Рис. 4. Сравнение форм сигналов на фазовой плоскости для первой (а) и второй (б) моделей

а для второй модели представление несимметрично и траектория движения на фазовой плоскости выявляет удвоение периодов. При внимательном рассмотрении петли гистерезиса это также очевидно для второй модели.

Практическая значимость проведенного моделирования в среде MATLAB Simulink – получение результатов, на основании которых можно разработать мероприятия и снизить негативное воздействие феррорезонанса на электротехнические системы.

Перспективы исследования заключаются в том, чтобы сопоставить результаты моделирования с экспериментальными для проверки адекватности моделирования в среде MATLAB Simulink.

Заключение

В статье рассмотрены схемотехнические решения для предотвращения феррорезонансных явлений, которые включают активную, пассивную и электронную схемы подавления феррорезонанса. Для расчета электрических сетей с феррорезонансными явлениями применяется программное обеспечение ATP / EMTP, PSpice, FerroTool, FerroSim, MATLAB и др. При этом предложены две модели для изучения явления феррорезонанса и выполнено моделирование простой схемы феррорезонанса с помощью пакета MATLAB Simulink. Общим для обеих моделей является способ их получения, а именно измерение в перенасыщенной области (как можно дальше от изгиба характеристики намагничивания). В результате построены петли гистерезиса и выполнено сравнение форм сигналов на фазовой плоскости. Показано, что для первой модели представление симметрично, т. е. это ка-

сается феррорезонанса на основной частоте, а для второй модели оно несимметрично и траектория движения на фазовой плоскости выявляет удвоение периодов, что очевидно также для этой модели при рассмотрении петли гистерезиса.

Библиографический список

1. Dommel H. W. Electromagnetic transients program / H. W. Dommel. – Reference Manual (EMTP) Theory Book. – Portland, Oregon: BPA, 1986. – 305 p.
2. Ferracci Ph. Ferroresonance / Ph. Ferracci // Cahiers Techniques Schneider. Collection Technique Groupe Schneider. – 1998. – N ECT 190. – P. 2.
3. Val Escudero M. Characterization of ferroresonant modes in HV substation with CB Grading Capacitors / M. Val Escudero, I. Dudurych, M. A. Redfern // Proceedings of the 6th International Conference on Power Systems Transients. – 2005. – N IPST 05–146. – P. 1–6.
4. Piasecki W. Ferroresonance involving voltage transformers in medium voltage networks / W. Piasecki, M. Florkowski, M. Fulczyk, P. Mahonen, M. Luto, W. Nowak // Proceedings of the 14th International Symposium on the High Voltage Engineering. – Beijing: Tsinghua University, 2005. – P. F–19.
5. Graovac M. Fast ferroresonance suppression of coupling capacitor voltage transformers / M. Graovac, R. Iravani, X. Wang, R. D. McTaggart // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2003. – Vol. 18. – N 1. – P. 158–163.
6. Sanaye-Pasand M. Ferroresonance occurrence during energization of capacitive voltage substations / M. Sanaye-Pasand, R. Aghazadeh, H. Mohseni // IEEE Power Engineering Society General Meeting. – 2003. – Vol. 2. – P. 601–606.
7. Piasecki W. Mitigating ferroresonance in HV inductive transformers / W. Piasecki, M. Stosur, M. Florkowski, M. Fulczyk, B. Lewandowski // International Conference on Power Systems Transients. – 2009. – N IPST 09–150. – P. 1–5.
8. Burgess R. Minimising the risk of cross-country faults in systems using arc suppression coils / R. Burgess, A. Ahfock // Works of University of southern Queensland. – Australia. – 2011. – N 7. – P. 703–711.
9. Martínez R. C. Calidad de producto de la energía eléctrica: huecos e interrupciones breves / R. C. Martínez, T. Gómez San Román // Anales de mecánica y electricidad. – 2006. – P. 13–17.
10. Peng A. S. Ferroresonance simulation studies of transmission systems: PhD in Electrics and Electronic Engineering / A. S. Peng. – Manchester, UK: The University of Manchester, 2010. – 271 p.
11. Xinhui Zhang. Simulation analysis of zero modal transient characteristics of single-phase earth fault / Zhang Xinhui, Xue Yongduan, Pan Zhencun // China International Conference on electricity distribution. – 2006. – N 69. – 6 p.
12. Radmanesh H. Analyzing ferroresonance phenomena in power transformers including zinc oxide arrester and neutral resistance effect / H. Radmanesh, G. B. Gharehpetian, F. S. Hamid. – Cairo: Hindawi Publishing Corporation, 2012. – 4 p.
13. Radmanesh H. Resistive ferroresonance limiter for potential transformers / H. Radmanesh, G. B. Gharehpetian, F. S. Hamid. – Iran.: Amirkabir University of Technology, 2012. – 6 p.
14. Bronzeado H. S. Review of ferroresonance phenomenon on power systems: Practical examples and experience with adopted solutions / H. S. Bronzeado, Z. Emin, L. Kocis,

E. B. Shim // Cigrè International Symposium on Assessing and Improving Power System Security, Reliability and Performance in Light of Changing Energy Sources, At Recife. – Brazil. – 2011. – 10 p.

15. Organization Standart 56947007-29.240.10.248. Norms of technological design of 35–750 kV AC substations. – M.: PJSC “FSC UES”, 2017. – 135 p.

Дата поступления: 19.03.2021

Решение о публикации: 22.03.2021

Контактная информация:

ПОПУГАЕВ Александр Валерьевич – аспирант; aleksandr.popugaev@gmail.com

A study of the features of the phenomenon of ferroresonance in electrical networks of 6–35 kV based on mathematical modeling

A. V. Popugayev

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Popugayev A. V. A study of the features of the phenomenon of ferroresonance in electrical networks of 6–35 kV based on mathematical modeling. *Bulletin of scientific research results*, 2021, iss. 2, pp. 59–68. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2021-2-59-68

Summary

Objective: To analyze the existing circuitry solutions in order to prevent ferroresonance phenomena. Simulate the phenomenon of ferroresonance in MATLAB Simulink to reduce its negative impact on electrical systems. **Methods:** The applied methods are based on the analysis, synthesis and mathematical modeling of electrical systems in the event of ferroresonance. **Results:** The necessity of improving circuitry solutions to prevent ferroresonance phenomena is shown. The possibility of using the modeling of ferroresonance phenomena in the MATLAB Simulink environment is shown in order to reduce the negative impact of ferroresonance and increase the reliability of the operation of electrical systems. **Practical importance:** When simulating in the MATLAB Simulink environment, you can get results that will allow you to develop measures to reduce the negative impact of ferroresonance on electrical systems.

Keywords: Ferroresonance, modeling, electrical systems, hysteresis loop, voltage transformers.

References

1. Dommel H. W. Electromagnetic transients program. *Reference Manual (EMTP) Theory Book*. Portland, Oregon, BPA Publ., 1986, 305 p.
2. Ferracci Ph. Ferroresonance. *Cahiers Techniques Schneider. Collection Technique Groupe Schneider*, 1998, no. ECT 190, p. 2.

3. Val Escudero M., Dudurych I. & Redfern M. A. Characterization of ferroresonant modes in HV substation with CB Grading Capacitors. *Proceedings of the 6th International Conference on Power Systems Transients*, 2005, no. IPST 05–146, pp. 1–6.
4. Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Mahonen P., Luto M. & Nowak W. Ferroresonance involving voltage transformers in medium voltage networks. *Proceedings of the 14th International Symposium on the High Voltage Engineering*. Beijing, Tsinghua University Publ., 2005, p. F–19.
5. Graovac M., Iravani R., Wang X. & McTaggart R. D. Fast ferroresonance suppression of coupling capacitor voltage transformers. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2003, vol. 18, no. 1, pp. 158–163.
6. Sanaye-Pasand M., Aghazadeh R. & Mohseni H. Ferroresonance occurrence during energization of capacitive voltage substations. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2003, vol. 2, pp. 601–606.
7. Piasecki W., Stosur M., Florkowski M., Fulczyk M. & Lewandowski B. Mitigating ferroresonance in HV inductive transformers. *International Conference on Power Systems Transients*, 2009, no. IPST 09–150, pp. 1–5.
8. Burgess R. & Ahfock A. Minimising the risk of cross-country faults in systems using arc suppression coils. *Works of University of southern Queensland*, Australia, 2011, no. 7, pp. 703–711.
9. Martínez R. C. & Gómez San Román T. Calidad de producto de la energía eléctrica: huecos e interrupciones breves. *Anales de mecánica y electricidad*, 2006, pp. 13–17.
10. Peng A. S. *Ferroresonance simulation studies of transmission systems*. PhD in Electrics and Electronic Engineering. Manchester, UK, the University of Manchester Publ., 2010, 271 p.
11. Xinhui Zhang, Yongduan Xue & Zhencun Pan. Simulation analysis of zero modal transient characteristics of single-phase earth fault. *China International Conference on electricity distribution*, 2006, no. 69, 6 p.
12. Radmanesh H., Gharehpetian G. B. & Hamid F. S. *Analyzing ferroresonance phenomena in power transformers including zinc oxide arrester and neutral resistance effect*. Cairo, Hindawi Publishing Corporation Publ., 2012, 4 p.
13. Radmanesh H. & Hamid F. S. *Resistive ferroresonance limiter for potential transformers*. Iran, Amirkabir University of Technology Publ., 2012, 6 p.
14. Bronzeado H. S., Emin Z., Kocis L. & Shim E. B. Review of ferroresonance phenomenon on power systems: Practical examples and experience with adopted solutions. *Cigrè International Symposium on Assessing and Improving Power System Security, Reliability and Performance in Light of Changing Energy Sources, At Recife*. Brazil, 2011, 10 p.
15. *Organization Standart 56947007-29.240.10.248. Norms of technological design of 35–750 kV AC substations*. Moscow, PJSC “FSC UES” Publ., 2017, 135 p.

Received: March 19, 2021

Accepted: March 22, 2021

Author’s information:

Aleksandr V. POPUGAYEV – Postgraduate Student; aleksandr.popugaev@gmail.com